

〈特輯 都市水害〉

都市雨水의 水質特性 및 豫測모델

崔 勝 一 *

1. 序 言

우수(雨水)의 水質은, 근래에 까지 별 주목을 받지 못한 채, 다량의 雨水에 의한 稀釋效果로 인하여 양호할 것으로 막연히 추측되어져 왔다. 그러나 1970년대에 들어와 US EPA의 지원하에 행해진 雨水의 水質에 대한 조사·분석 결과는 雨水가 예상외로 많은 汚染物質을 포함하고 있었으며 적절한 처리가 필요한 것으로 나타났다. 특히 乾期 이후, 降雨流入初期에는 그 BOD의 濃度가 일반 生活下水보다도 높은 경우가 다수였다.

현재 美國·日本을 비롯한 여러나라에서는 雨水의 水質을 분석·기록하고 있으며 水質豫測 모델을 연구·개발하고 있으나 아직 우리나라에서는 본격적인 雨水의 水質調査나 豫測모델 및 處理技法이 연구되고 있지 않는 실정이다.

2. 雨水의 汚染 및 지역에 따른 特性

雨水가 汚染物質을 포함하는 주 원인은 雨水가 流出時 地表에 축적된 여러가지 汚染物質을 취하기 때문이나 부차적으로는 雨水 集水井에 남아있던 부패된 有機物質 또는, 合流式 管渠인 경우, 乾燥期에 管内에 堆積되어 있던 生活下水가 휩쓸려 나와 雨水의 汚染度를 증가 시키기도 한다. 雨水 流入의 초기에 나타나는 이 衝擊現象이 그림1에 나타나 있다.

雨水의 水質特性은 降雨强度和 季節에 따라서

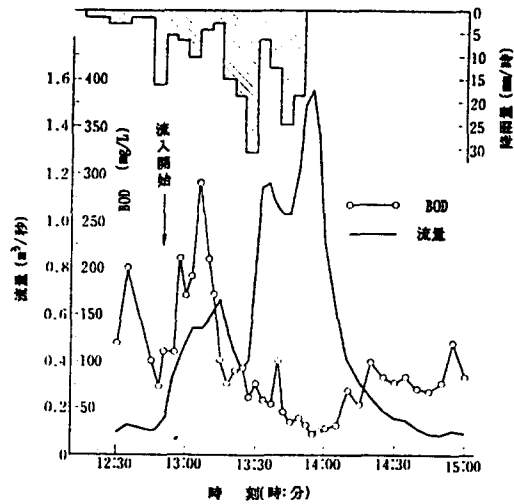


그림1. 雨水流入 初期의 BOD 濃度

변하는 한편 農村地域, 鑛山地域, 森林地域, 都市地域 등 땅의 사용용도에 따라서도 달라진다. 농촌지역에서는 殺蟲劑, 除草劑 등과 함께 가축의 排泄物, 飼料가 流出되어 나오고, 鑛山地域에서는 鑛物質과 함께 酸性雨水가 湖水 및 河川으로 흘러들고 있으며 삼림지역을 통과한 雨水에는 낙엽 및 식물의 부패로 인한 BOD, COD, SS 등의 포함되어 있다. 도시지역은 다른 지역보다도 지표면의 鋪裝率이 높고, 사회활동이 다양하므로 雨水의 水質이 가장 복잡한 양상을 띄게 된다.

3. 都市雨水

복잡한 도시의 기능을 크게 다섯으로 구분하여 그 기능지역별로 排出하는 雨水의 汚染物質을 살

* 韓國建設技術 研究院 環境研究室 先任研究員 工博

펴보면 다음과 같다.

(1) 住居地域 : 애완동물의 배설, 낙엽, 쓰러진 수거시 흘린 찌꺼기 등으로부터 有機物質, 微生物 및 인, 窒素 등의 營養鹽類가 流出된다.

(2) 建設工事地域 : 건설공사 시에 表土가 제거되고 雨水에 깎이기 쉬운 토양이 노출되어, 微粒土, 細沙 등이 다량 流出된다. 이렇게 유출되는 미립토들은, 토양의 화학적 특성에 의하여 결합되어 있던 營養鹽類 및 重金屬의 搬搬媒體가 된다.

(3) 産業地區 : 工場의 貯藏施設, 運送 pipe로부터 汚染物質의 流出, 汚染가스의 排出등으로 산업지구로 부터의 雨水은 oil, 중금속들을 포함한 有毒性인 경우가 다수이다.

(4) 道路 : 도로에 축적되는 오염물질은 주로 자동차로 부터 基因하는 데 배기가스로부터는 납, 窒素酸化물들이, 타이어의 마모로 부터 고무분진이, 오일이나 윤활유의 누출로 부터 oil이 축적되고 이들이 雨水에 쓸려나온다.

(5) 商業地區 : 상업지구의 雨水에는 주거지역과 도로에서 나오는 오염물질이 섞여있는 경우가 대부분이다.

이상에서 각 기능지역별 주배출물질을 분류하여 보았으며, EPA에서는³⁾ 미국내 15개의 표본 도시의 자료를 조사하여 도로에 축적되는 汚染物質에 대하여 다음과 같은 結論을 도출하였다.

① 汚染物質이 쌓이는 속도는 상업지역, 교통혼잡 지역, 나무가 덜컹지역 그리고 콘크리트 표면이 가장 느리다. 그 이유로는 상업지역은 빈번한 청소때문에 그리고 교통혼잡 지역은 자동차가 일으키는 바람때문에 汚染物質이 除去되기 때문이다.

② BOD₅의 濃度는 적당한 교통량을 가진 지역, 아스팔트 표면, 그리고 이외에도 住居地域과 重工業地域에서 最低였다.

③ COD의 濃度도 年間 氣候차이가 많지 않은 지역, 적당한 교통량을 가진 지역에서 낮았으며 주거지역, 중공업지역이 상업지역보다 많이 낮았다. 상업지역이 높은 COD값을 보인 이유로는 주차된 차로 부터 누출된 oil에 基因하는 것으로 사

료되었다.

④ ortho-phosphate의 濃度는, 주거지역에서 잔디에 비료를 뿌림에도 불구하고 예상외로 인의 濃度가 낮았으며 아스팔트 표면과 적당한 교통량을 가진 지역, 그리고 造景이 되어있지 않은 지역에서 낮았다.

⑤ 窒素酸化物(Nitrogen Oxides)의 濃度는 造景이 없는 지역, 차량밀도 (Traffic Density)가 크게 차이나지 않는 지역, 기후차이가 크지 않은 지역에서 낮았으며 重工業地域도 낮은 Nitrate 濃度가 나왔다.

⑥ 납의 濃度도 콘크리트 노면, 잔디로 造景이 된 지역, 교통량이 적은 지역, 및 住居地域, 重工業地域에서 낮았다.

⑦ 大腸菌의 檢出도 交通量 폭주지역, 조경이 크게 달라지지 않은 곳에서 낮게 檢出되었다.

EPA의 결론은 예상외의 것도 있었으며, 이에 대한 조사·분석은 계속 필요하다고 하겠다. 都市 雨水에 포함된 汚染物質의 濃度範圍를 美國內 4개도시에서 分析한 결과를 표1에, 그리고 8개 도시에서 표본採取한 雨水에 포함된 汚染物質의 粒徑分布를 표2에 나타내었다.

4. 豫測모델

雨水의 汚染에 관련된 모델은 크게 두 가지로 대변되는데 하나는 降雨와 降雨사이의 도로변에 蓄積되는 汚染物質의 양에 대한 것이고, 다른 하나는 강우가 시작된 후 雨水에 포함된 汚染物質의 濃度를 豫測하는 모델이다.

이 두 모델은 큰 의미로서는 서로 보완상태에 있는 것으로서 그 基本概念은 다음과 같다.

路面 汚染物質 축적모델의 기본 개념은, 노면에 축적되는 汚染物質의 變化率은 汚染物質의 축적율에서 감소율을 제외시킨 것과 같다는 것으로 그 수학적 표현은 다음과 같다.

$$dL / dt = C - k \cdot L \dots\dots\dots (1)$$

dL / dt: 汚染物質의 蓄積率 (g / 노면 km / day)
 L: 街路邊의 汚染物質量 (g / 노면 km)
 C: 汚染物質 蓄積常數 (g / 노면 km / day)

Table 1. 미국內 都市雨水에 포함된 汚染物質 濃度범위

Pollutant	Durham, North Carolina ^a			Cincinnati, Ohio ^b			Tulsa, Oklahoma ^c			APWA ^d	
	Range (mg/l)		Mean	Range (mg/l)		Mean	Range (mg/l)		Mean	Range (mg/l)	
	Low	High		Low	High		Low	High		Low	High
BOD	-	-	-	2	84	19	8	18	11.8	1	700
COD	20	1042	170	20	610	99	42	138	85.5	5	3100
Total solids	194	8620	1440	-	-	-	199	2242	545	450	14,600
Volatile suspended solids	5	970	122	1	290	53	-	-	-	12	1600
Suspended solids	27	7340	1223	5	1200	210	84	2052	367	2	11,300
pH	-	-	-	5.3	8.7	7.5	6.8	8.4	7.4	-	-
Total PO ₄	0.2	16	0.82	0.07	4.3	0.8	0.54	3.49	1.15	0.1	125
NO ₃	-	-	-	0.1	1.5	0.4	-	-	-	-	-
Chlorides	-	-	-	-	-	-	2	46	11.5	2	25,000
Pb	0.1	2.86	0.46	-	-	-	-	-	-	0	1.9
Ca	1.1	31	4.8	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	0.04	0.50	0.15	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	1.3	58.7	12	-	-	-	-	-	-	-	-
Mg	3.6	24	10	-	-	-	-	-	-	-	-
Mn	0.12	3.2	0.67	-	-	-	-	-	-	-	-
Aiike	24	124	56	10	210	59	-	-	-	-	-
Fecal coliforms (#/100 ml)	100	200,000	23,000	-	-	-	10	18,000	420	55	112 x 106

a. Colston, N.V., Jr., EPA 670/2-74-096, 1974
 b. Weibel, et. al. JWPCF 36:914-924, 1964
 c. AVCO Economic Systems Corporation, Report No. 11034 FKL, 1970
 d. American Public Work Association, Report No. WP-20-15, 1969
 Sartor, J.D. & Boyd, G.B., EPA-R2-72-081, 1972.

Table 2. 미국內 8個 都市의 雨水에 포함된 汚染物質의 粒徑分布(중량비)

오 염 물 질	粒 徑 (μ)					
	>2000	840-2000	246-840	104-246	43-104	<43
Total solids	22.4	7.6	24.6	27.8	9.7	5.9
Volatile solids	11.0	17.4	12.0	16.1	17.9	25.6
BOD ₅	7.4	20.1	15.7	15.2	17.3	24.3
COD	2.4	4.5	13.0	12.4	45.0	22.7
Nitrates	8.6	6.5	7.9	16.7	28.4	31.9
Phosphates	0	0.9	6.9	6.4	29.6	56.2
Total pesticides	0	16.0	26.5	25.8		31.7
Total heavy metals	16.3	17.5	14.9	23.5		27.8
Lead	1.7	2.6	8.7	42.5		44.5
Copper	22.5	20.0	16.5	19.0		22.0
Mercury	16.4	28.8	16.4	19.2		19.2

Sartor, J.D. & Bogd, G.B., EPA-R2-72-081, 1972.

k:汚染物質 減少係數(day⁻¹)

t:時間(day)

위 (1)식을 積分하면 다음을 얻는다.

$$L = \frac{C}{k} [1 - \exp(-kt)] \dots\dots\dots (2)$$

式 (2)의 意味는, 街路에서 汚染物質의 蓄積은 지난 降雨 또는 청소 이래 시간의 함수이며 축적 량은 최대값(c/k)으로 수렴되며 이의 이론적 곡 선분포는 그림 2와 같다. 이 모델에 대한 檢證은 Sartor와 Boyd에 의하여 행해졌으며 그 결과는 그림3과 같다.

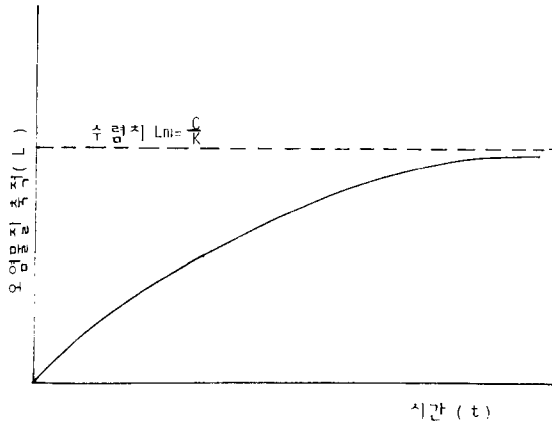


그림2. 汚染物質 蓄積 모델의 理論的 曲線分佈

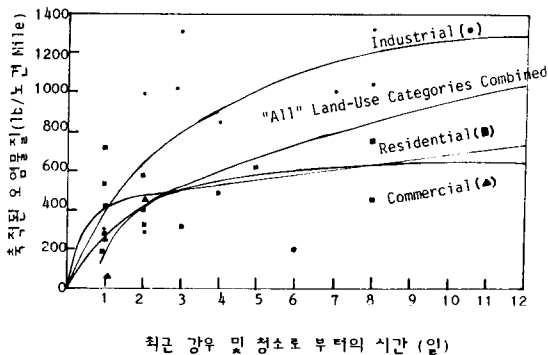


그림3. 汚染物質 蓄積의 實測值

Sartor, J.D., & Boyd, G.B., EPA-R2-72-081, 1972

또한 L 및 C의 수치에 대한 조사도 여러 研究者들에 의하여 다방면으로 행하여졌다. 표3, 4, 6은 모델중의 C값을 정해보려는 노력이었으며, 표5와 7은 L치를 산정하려 한 것이었다.

Table 3. 시카고市の 1日 汚染物質 平均蓄積量

지역	平均蓄積量(1b/일/mile 노건)			
	BOD	COD	N	PO ₄
단세대 주거지역	0.36	2.95	0.03	0.004
다세대 주거지역	0.87	9.70	0.15	0.012
상업지구	2.70	13.6	0.14	0.024
산업지구	1.45			

Roesner, L.A.
University of Massachusetts, Dept. of Civil Eng.
Aug. 1974.

Table 4. 지역특성에 따른 일(日)당 오염물질 평균축적량(1b/노건 mile/일)

오염물질	지역별		
	주거지역	산업지역	상업지역
Total solids	590	1400	180
Volatile solids	44	77	14
BOD ₅	3.6	7.2	0.99
COD	20	81	5.7
Nitrates	0.019	0.055	0.055
Phosphates	0.37	1.1	0.10
Total heavy metals	1.2	1.6	0.34

Sartor & Boyd, EPA-R2-72-081, 1972.

Table 5. 지역특성에 따른 오염물질 축적량 (1b/노건 mile)

오염물질	지역별		
	주거지역	산업지역	상업지역
Total solids	1200	2800	360
Volatile solids	86	150	28
BOD ₅	11	21	3
COD	25	100	7
Nitrates	0.06	0.18	0.18
Phosphates	1.1	3.4	0.3
Total heavy metals	0.58	0.76	0.18

Sartor & Boyd, EPA-R2-72-081, 1972

Table 6. 미국內 8個 都市의 일(日)당 오염물질 平均蓄積量(lb/노건 mile/일)

City	Date of study	Total solids	BOD ₅	COD	Nitrate	Phosphate	Total heavy metals
San Jose	Dec. 1970	70	1.2	24	-	0.054	0.34
Pheonix	Jan. 1971	92	0.93	4.3	0.041	0.031	-
Milwaukee	Apr. 1971	2700	12.0	48	0.052	0.27	4.3
Baltimore	May 1971	260	-	-	0.0095	0.25	0.68
Seattle	July 1971	-	-	-	0.01	-	-
Atlanta	June 1971	220	0.95	6.5	0.012	0.13	0.21
Tulsa	June 1971	-	-	-	-	-	-
Bucyrus	Apr. 1971	690	1.4	25	0.060	0.12	-

Sartor & Boyd, EPA-R2-72-081, 1972.

Table 7. 미국內 8個 都市의 오염물질 축적량(lb/노건 mile)

City	Date of study	Curb miles	Total solids	Volatile solids	BOD ₅	COD	Nitrates	Phosphates
San Jose	Dec. 1970	2300	910	66	16	310	-	0.70
Phenoix	Jan. 1971	2900	650	40	7	30	0.29	0.22
Milwaukee	Apr. 1971	3400	2700	180	12	48	0.052	0.27
Baltimore	May 1971	3900	1000	96	-	-	0.038	1.0
Seattle	July 1971	2600	460	29	5	17	0.027	0.49
Atlanta	June 1971	3500	430	18	2	113	0.024	0.26
Tulsa	June 1971	3600	330	19	14	30	0.12	0.54
Bucyrus	Apr. 1971	200	1400	150	3	29	0.12	0.25

Sartor & Boyd, EPA-R2-72-081, 1972.

우수에 포함된 汚染物質의 濃度を 예측하는 모델은, 강우 개시 후 가로에 남아있는 汚染物質의 양은 降雨時間과 平均유출율(average runoff rate)에 관계가 있음에 착안한 것으로서 다음과 같다.

$$p(t+\Delta t) = p(t) \cdot \exp[-k' \cdot \bar{R} \cdot \Delta t] \dots\dots\dots (3)$$

$p(t)$, $P(t+\Delta t)$: 강우시작후 시각 t 와 $t+\Delta t$ 에 서 차로에 남아있는 오염물질의 양(lb/노건 mile)

k' : 汚染物質除去係數(지역과 汚染物質에 따라 달라지며 작은 값일수록 같은%의 汚染物質을 除去하기 위하여 더 많은 강우가 필요하다. $k' \leq 4.6$)

\bar{R} : 시간 Δt 사이의 平均 流出率(average

$$\text{Runoff Rate}) R = \frac{1}{2} [\bar{R}(t+\Delta t) + R(t)] \text{ (in/hr)}$$

Δt : 時間(hours)

따라서 시각 t 와 $t+\Delta t$ 사이에서 제거된 汚染物質의 濃度は 다음 식으로 구해진다.

$$\frac{\Delta P}{Q} = \frac{1}{Q} [P(t) - p(t+\Delta t)] = (p(t)/Q) [1 - \exp(-k' \cdot \bar{R} \cdot \Delta t)] \dots\dots\dots (4)$$

ΔP : Δt 사이에 제거된 汚染物質의 量

Q : Δt 사이의 流出量

$$(Q = \bar{R} \cdot \Delta t)$$

이 $\frac{\Delta P}{Q}$ 를 시간의 변수로 나타낸 것을 汚染度 曲線, 流出된 汚染物質의 총량을 나타낸 것을 負荷 曲線이라 하며 그림4와 같은 曲線分布를 가진다.

표8. 수질예측 모델과 예측범주
USEPA 600/2-76-175a, 1976

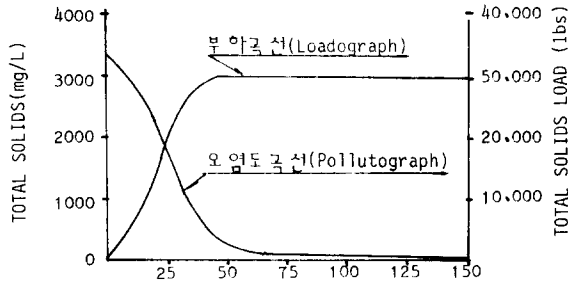


그림4. 汚染度 曲線 및 負荷曲線의 曲線分佈例

이상에서 水質豫測 모델의 基本理論을 檢討해 본 결과 이 기본 개념을 이용하여 실제 모델을 만들 때에는 다음과 같은 점에 유념할 필요가 있다.

- ① 시간당, 일당, 계절당 변하는 水質을 고려하도록 한다.
- ② 雨水 集水井에 건기시 남아있는 有機物質의 流出을 모델에 상정한다.
- ③ 雨水運般中の 관거 내에서의 침전, 浮遊를 고려한다.
- ④ 雨水의 集水 및 저장시 汚染物質相互間的의 반응이나 간섭을 고려한다.

현재 미국에서 쓰이고 있는 雨水에 관한 모델들은 대부분이 雨水의 水質豫測을 위한 모델이라기 보다는 雨水管理를 위한 數量的 모델들이나, 그중 몇몇이 雨水의 수질예측적 측면을 포함하고 있다. 수질예측이 가능한 모델들과 그 예측범주는 표8과 같으며 이들의 概要는 다음과 같다.

① Battelle Northwest Model 7개까지의 水質 汚染要素에 대하여 예측이 가능하나 1회 降雨流出에 대한 予測으로 한정된다. 設計補助的 側面에서, 處理水나 越流水의 水質에 대한 제한조건 하에서 가장 경제적인 下水管渠의 크기, 월류수 저장시설 및 處理施設의 規模를 정한다.

② COE Storm Model:未處理 越流水의 水質을 基準值 以下로 유지하기 위한 저장시설 및 처리시설의 규모를 算定하기 위한 모델로서, SS, 沈殿性 固形物, BOD, 窒素 및 인의 濃度를 계산

	WASTEWATER QUALITY									
	DRY-WEATHER QUALITY	STORMWATER QUALITY	QUALITY ROUTING	SEDIMENTATION AND SCOUR	QUALITY REACTIONS	WASTEWATER TREATMENT	QUALITY BALANCE BETWEEN STORMS	RECEIVING WATER FLOW SIMULATION	RECEIVING WATER QUALITY SIMULATION	
BATTELLE NORTHWEST	●	●	●			●				
BRITISH ROAD RESEARCH LAB									●	
CHICAGO FLOW SIMULATION									●	
CHICAGO HYDROGRAPH METHOD									●	
COLORADO STATE UNIVERSITY										
CORPS OF ENGINEERS		●			●		●			
DORSCH CONSULT	●	●	●				●	●		
ENV PROTECTION AGENCY	●	●	●	●	●	●		●	●	
HYDROCOMP	●	●	●		●		●	●	●	
MASSACHUSETTS INST OF TECH.								●		
MINNEAPOLIS-ST. PAUL										
SEATTLE										
SOGREAH			●					●	●	
UNIVERSITY OF CINCINNATI								●		
UNIVERSITY OF ILLINOIS										
UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS										
WATER RESOURCES ENGINEERS	●	●	●		●			●	●	
WILSEY AND HAM										

한다. 초기단계의 계획에 적절한 모델이나 건기의 수질예측은 하지 못한다.

③ EPA Stormwater management Model:SS, 沈殿性 固形物, BOD, COD, coliform Bacteria, 窒素, 인, oil, grease의 농도를 예측하며 放流水가 河川의 流量과 水質에 미치는 影響을 평가할 수 있다.

9개 까지의 水處理 單位工程의 效率과 費用을 계산할 수 있으며 과부하가 걸리지 않도록 관거의 크기를 결정할 프로그램을 添加할 수 있다.

④ Hydrocomp Model 17개까지의 要素를 추적할 수 있으며 그 요소들의 자연수 속에서의 反應 및 相互作用을 모의검정(Simulation)할 수 있다. 원래는 도시지역을 위한 모델이 아니었으나

여러번의 보정을 통하여 어디에서나 적용 가능하도록 되었다.

이 모델의 최대 장점은 복잡한 Network에서 乾期와 雨期의 水量과 水質을 계속적으로 모의검정(simulation)할 수 있는 점이다.

⑤ Water Resources Engineers Stormwater Management Model: EPA Stormwater Management Model의 수정판이며, SS, 沈殿性 固形物, BOD, 窒素, 인, oil Grease를 포함한 23개 水質要素를 乾期와 雨水流出시 모두 추적할 수 있다. 그러나 이 모델은 水處理 工程이나 비용 계산은 하지 못한다.

5. 結 言

이상에서 雨水 특히 都市雨水의 汚染과 汚染度 예측모델의 기본이론 및 사용되는 Model의 개요에 대하여 살펴보았다. 美國 및 日本에서는 이 기본개념을 이용한 여러모델이 계속 개발되고 있을 뿐 아니라 이미 나와 있는 모델들에 대한 꾸준한 보정이 이루어지고 있는 실정이나 우리나라에서는 아직도 연구가 되어지지 않고 있다. 우리나라의 도시들은 인구의 밀집도, 교통량, 쓰레기 收去方法, 공장지대의 근접 등 여러 여건이 다른 나라와 달리 독특하므로 우리의 여건에 맞는 雨水 水質豫測모델의 開發과 經濟的인 처리방법이 개발이 艱요하다 하겠다.

참 고 문 헌

1. 合流式 下水道 越流水 對策의 暫定指針, 日本下水道協會, 1982.
2. Overton, D. E. & Meadows, M. E., "Stormwater Modeling." Academic Press, N.Y. 1976.
3. U.S. EPA. "Water Quality Management for Urban Runoff." EPA 440-9-75-004, 1974.
4. Colston, N.V., Jr., "Characterization and treatment of urban land runoff." EPA 670/2-74-096, 1974.
5. Weibel, S. R., Anderson, R. J., and Woodword, R. L. "Urban land runoff as a factor in stream pollution." JWPCF 36:914-924, 1964.
6. AVCO Economic Systems Corporation, "Stormwater Pollution from urban land activity." Water Pollution Control Research Series, Federal Water Quality Administration, Report No. 11034FKL, 1970.
7. American Public Works Association. "Water Pollution aspects of urban runoff." Water Pollution control Research Series, Federal Water Quality Administration, Report No. WP-20-15, 1969.
8. Sartor, J. D., and Boyd, G. B., "Water Pollution aspects of street surface contaminants." EPA-R2-72-081, 1972.
9. Roesner, L. A., "Quality aspects of urban runoff." Dept. of Civil Engineering, Univ. of Massathusetts, 1974.
10. U.S. EPA, "Assessment of Mathematical Models for Storm and Combined Sewer Management" EPA 600/2-76-175a, 1976.